

УДК 629.735.017.1.004.64

Є.М. Карпов, А.Є. Карпов

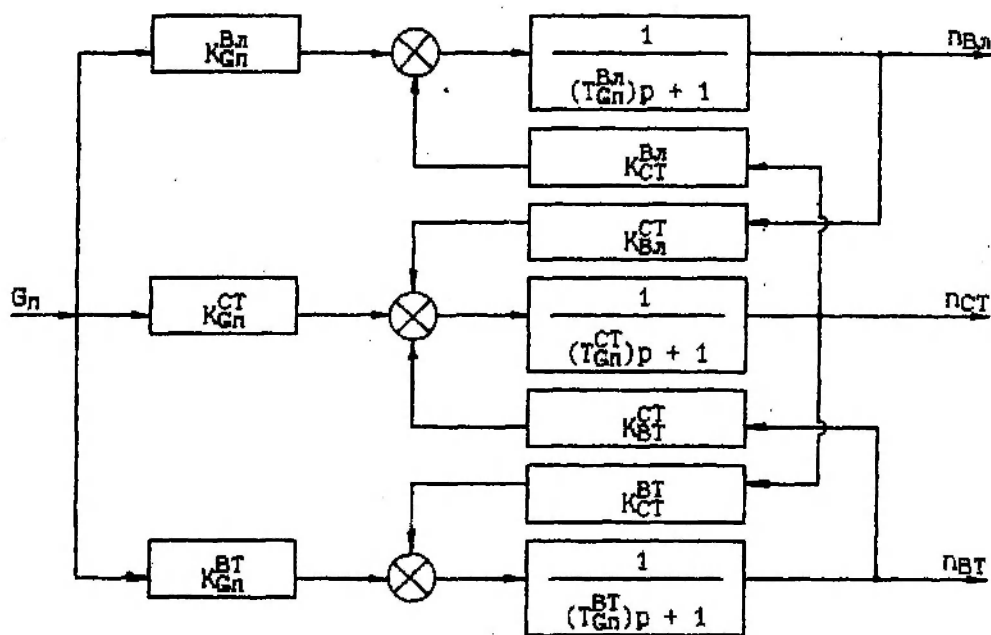
ДІАГНОСТУВАННЯ ТРЬОХВАЛЬНИХ ТУРБОРЕАКТИВНИХ ДВОКОНТУРНИХ ДВИГУНІВ ЗА ДИНАМІЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Розглянуто структурно-динамічну схему трьохвального ТРДД та методику визначення їх базових динамічних параметрів двигунів з використанням дросельних та моментних характеристик. Наведені підходи до діагностування трьохвальних ТРДД за базовими динамічними параметрами.

Одним з перспективних методів діагностування проточної частини газотурбінних двигунів є діагностування за зміною динамічних параметрів двигуна, викликаних зношуванням деталей компресора та турбіни, а також відхиленнями в роботі камери згоряння.

Розглянуті раніше в книгах [1, 2] підходи з розробки такої методики торкалися двохвальних турбореактивних двоконтурних двигунів (ТРДД) з незмінною геометрією проточної частини, а також двохвальних турбореактивних двигунів з форсажем (ТРДФ) з регульованим соплом [3]. Аналогічні підходи можуть бути використані і для діагностування проточної частини трьохвальних ТРДД.

Структурно-динамічна схема реалізованих трьохвальних ТРДД з одноступеневим вентилятором подана на рисунку.



Структурно-динамічна схема трьохвального ТРДД

Згідно із схемою, при одному керуючому параметрі, роль якого виконує витрата палива G_n , змінюються одночасно три вихідні параметри двигуна: частоти обертання роторів вентилятора $n_{вл}$, середнього $n_{СТ}$ та високого $n_{ВТ}$ тисків. Особливістю поданої схеми є те, що в ній не враховуються слабкі впливи крайніх роторів один на одного. Таке припущення

спрощує розрахункову частину методики діагностування. У той же час у процесі практичного відпрацювання цієї методики структурно-динамічна схема двигуна може бути удосконалена та доопрацьована.

Рівняння руху роторів трьохвального ТРДД записуються у вигляді:

$$\frac{J_{Вл}\pi}{30} n_{Вл} = \Delta M_{Вл};$$

$$\frac{J_{СТ}\pi}{30} n_{СТ} = \Delta M_{СТ};$$

$$\frac{J_{ВТ}\pi}{30} n_{ВТ} = \Delta M_{ВТ},$$

де $J_{Вл}, J_{СТ}, J_{ВТ}$ – масові полярні моменти інерції роторів ТРДД; $\Delta M_{Вл}, \Delta M_{СТ}, \Delta M_{ВТ}$ – надлишкові моменти на роторах вентилятора, середнього та високого тисків відповідно.

Надлишкові моменти можуть бути визначені при відомих моментах вентилятора, компресорів та турбін:

$$\Delta M_{Вл} = M_{ТВл} = M_{Вл};$$

$$\Delta M_{СТ} = M_{ТСТ} - M_{кСТ};$$

$$\Delta M_{ВТ} = M_{ТВТ} - M_{кВТ},$$

де $M_{ТВл} = M_{ТВл}(n_{Вл}, G_{Вл}, n_{СТ})$ – момент турбіни вентилятора;

$M_{Вл} = M_{Вл}(n_{Вл}, G_{п}, n_{СТ})$ – момент вентилятора;

$M_{ТСТ} = M_{ТСТ}(n_{СТ}, G_{п}, n_{Вл}, n_{ВТ})$ – момент турбіни середнього тиску;

$M_{кСТ} = M_{кСТ}(n_{СТ}, G_{п}, n_{СТ}, n_{ВТ})$ – момент компресора середнього тиску;

$M_{ТВТ} = M_{ТВТ}(n_{ВТ}, G_{п}, n_{СТ})$ – момент турбіни високого тиску;

$M_{кВТ} = M_{кВТ}(n_{ВТ}, G_{п}, n_{СТ})$ – момент компресора високого тиску.

При відомих моментних характеристиках вентилятора, компресорів і турбін є можливість записати рівняння динаміки трьохвального двигуна:

$$T_{G_{п}}^{Ел} \dot{\bar{n}}_{Вл} + \bar{n}_{Вл} = K_{G_{п}}^{Вл} \bar{G}_{п} + K_{СТ}^{Вл} \bar{n}_{СТ}; \quad (1)$$

$$T_{G_{п}}^{СТ} \dot{\bar{n}}_{СТ} + \bar{n}_{СТ} = K_{G_{п}}^{СТ} \bar{G}_{п} + K_{Вл}^{СТ} \bar{n}_{Вл} + K_{ВТ}^{СТ} \bar{n}_{ВТ}; \quad (2)$$

$$T_{G_{п}}^{ВТ} \dot{\bar{n}}_{ВТ} + \bar{n}_{ВТ} = K_{G_{п}}^{ВТ} \bar{G}_{п} + K_{СТ}^{ВТ} \bar{n}_{СТ}, \quad (3)$$

де $\bar{n}_{Вл}, \bar{n}_{СТ}, \bar{n}_{ВТ}, \bar{G}_{п}$ – відносні частоти обертання роторів двигуна та витрати палива; $T_{G_{п}}^{Вл}, T_{G_{п}}^{СТ}, T_{G_{п}}^{ВТ}$ – постійні часу роторів двигуна; $K_{G_{п}}^{Вл}, K_{G_{п}}^{СТ}, K_{G_{п}}^{ВТ}$ – коефіцієнти підсилення роторів двигуна за витратами палива; $K_{СТ}^{Вл}$ – коефіцієнт підсилення ротора вентилятора за частотою обертання ротора середнього тиску; $K_{Вл}^{СТ}, K_{ВТ}^{СТ}$ – коефіцієнти підсилення ротора середнього тиску за частотами обертання роторів вентилятора та високого тиску; $K_{СТ}^{ВТ}$ – коефіцієнт підсилення ротора високого тиску обертання за частотою обертання ротора середнього тиску.

Усі наведені коефіцієнти та постійні часу роторів є основними динамічними параметрами трьохвального ТРДД і можуть використовуватися при аналізі технічного стану двигунів. Визначення динамічних параметрів проводиться за моментними характеристиками з використанням часткових похідних:

$$T_{G_n}^{Вл} = \frac{\pi J_{Вл}}{30(\delta M_{Вл} / \delta n_{Вл} - \delta M_{мВл} / \delta n_{Вл})_0};$$

$$K_{G_n}^{Вл} = \frac{(\delta M_{мВл} / \delta G_n - \delta M_{Вл} / \delta G_n)_0}{(\delta M_{Вл} / \delta n_{Вл} - \delta M_{тВл} / \delta n_{Вл})_0} \cdot \frac{G_{п.б.}}{n_{Вл.б.}};$$

$$K_{CT}^{Вл} = \frac{(\delta M_{Вл} / \delta n_{CT} - \delta M_{тВл} / \delta n_{CT})_0}{(\delta M_{Вл} / \delta n_{Вл} - \delta M_{тВл} / \delta n_{Вл})_0} \cdot \frac{n_{CT.б.}}{n_{Вл.б.}};$$

$$T_{G_n}^{CT} = \frac{\pi J_{CT}}{30(\delta M_{кCT} / \delta n_{CT} - \delta M_{тCT} / \delta n_{CT})_0};$$

$$K_{G_n}^{CT} = \frac{(\delta M_{тCT} / \delta G_n - \delta M_{кCT} / \delta G_n)_0}{(\delta M_{кCT} / \delta n_{CT} - \delta M_{тCT} / \delta n_{CT})_0} \cdot \frac{G_{п.б.}}{n_{CT.б.}};$$

$$K_{Вл}^{CT} = \frac{(\delta M_{тCT} / \delta n_{Вл} - \delta M_{кCT} / \delta n_{Вл})_0}{(\delta M_{кCT} / \delta n_{CT} - \delta M_{тCT} / \delta n_{CT})_0} \cdot \frac{n_{Вл.б.}}{n_{CT.б.}};$$

$$K_{ВТ}^{CT} = \frac{(\delta M_{тCT} / \delta n_{ВТ} - \delta M_{кCT} / \delta n_{ВТ})_0}{(\delta M_{кCT} / \delta n_{CT} - \delta M_{тCT} / \delta n_{CT})_0} \cdot \frac{n_{ВТ.б.}}{n_{CT.б.}};$$

$$T_{G_n}^{ВТ} = \frac{\pi J_{ВТ}}{30(\delta M_{кВТ} / \delta n_{ВТ} - \delta M_{тВТ} / \delta n_{ВТ})_0};$$

$$K_{G_n}^{ВТ} = \frac{(\delta M_{тВТ} / \delta G_n - \delta M_{кВТ} / \delta G_n)_0}{(\delta M_{кВТ} / \delta n_{ВТ} - \delta M_{тВТ} / \delta n_{ВТ})_0} \cdot \frac{G_{п.б.}}{n_{ВТ.б.}};$$

$$K_{CT}^{ВТ} = \frac{(\delta M_{тВТ} / \delta n_{CT} - \delta M_{кВТ} / \delta n_{CT})_0}{(\delta M_{кВТ} / \delta n_{ВТ} - \delta M_{тВТ} / \delta n_{ВТ})_0} \cdot \frac{n_{CT.б.}}{n_{ВТ.б.}};$$

де $n_{Вл.б.}$, $n_{CT.б.}$, $n_{ВТ.б.}$, $G_{п.б.}$ – базові значення частот обертання роторів двигуна та витрати палива.

За базові слід брати відповідні значення параметрів до початку досліджуваного перехідного процесу двигуна.

Систему рівнянь (1), (2), (3), що описує рух роторів трьохвального ТРДД, можна вирішити відносно кожної змінної частоти обертання роторів двигуна й отримати три диференціальних рівняння третього порядку:

$$T_3^{3\omega} \ddot{n}_{Вл} + T_2^{2\omega} \dot{n}_{Вл} + T_{Вл} \dot{n}_{Вл} + L_{Вл} \bar{n}_{Вл} = M_{Вл} \bar{G}_n + N_{Вл} \bar{G}_n + Q_{Вл} \bar{G}_n; \quad (4)$$

$$T_3^{3\omega} \ddot{n}_{CT} + T_2^{2\omega} \dot{n}_{CT} + T_{CT} \dot{n}_{CT} + L_{CT} \bar{n}_{CT} = M_{CT} \bar{G}_n + N_{CT} \bar{G}_n + Q_{CT} \bar{G}_n; \quad (5)$$

$$T_3^{3\omega} \ddot{n}_{ВТ} + T_2^{2\omega} \dot{n}_{ВТ} + T_{ВТ} \dot{n}_{ВТ} + L_{ВТ} \bar{n}_{ВТ} = M_{ВТ} \bar{G}_n + N_{ВТ} \bar{G}_n + Q_{ВТ} \bar{G}_n \quad (6)$$

Прийняті позначення коефіцієнтів у рівняннях (4), (5) та (6) подані нижче:

$$T_3^3 = T_{G_n}^{Вл} T_{G_n}^{СТ} T_{G_n}^{ВТ};$$

$$T_2^2 = T_{G_n}^{Вл} T_{G_n}^{СТ} + T_{G_n}^{Вл} T_{G_n}^{ВТ} + T_{G_n}^{СТ} T_{G_n}^{ВТ};$$

$$T_{Вл} = T_{G_n}^{Вл} + T_{G_n}^{СТ} + T_{G_n}^{ВТ} - T_{G_n}^{ВТ} K_{Вл}^{СТ} K_{СТ}^{Вл} + T_{G_n}^{Вл} K_{СТ}^{ВТ} / K_{СТ}^{Вл};$$

$$T_{СТ} = T_{G_n}^{Вл} + T_{G_n}^{СТ} + T_{G_n}^{ВТ} - T_{G_n}^{ВТ} K_{СТ}^{Вл} K_{Вл}^{СТ} - T_{G_n}^{Вл} K_{СТ}^{ВТ} K_{ВТ}^{СТ} + T_{G_n}^{СТ} K_{СТ}^{ВТ} / K_{ВТ}^{СТ} + K_{СТ}^{Вл} / K_{Вл}^{СТ};$$

$$T_{ВТ} = T_{G_n}^{Вл} + T_{G_n}^{СТ} + T_{G_n}^{ВТ} - T_{G_n}^{Вл} K_{ВТ}^{СТ} K_{СТ}^{ВТ} + T_{G_n}^{ВТ} K_{СТ}^{Вл} / K_{СТ}^{ВТ};$$

$$L_{Вл} = 1 + K_{Вл}^{СТ} K_{СТ}^{Вл} + K_{СТ}^{ВТ} / K_{СТ}^{Вл};$$

$$L_{СТ} = 1 + K_{ВТ}^{Вл} K_{Вл}^{ВТ} + K_{Вл}^{ВТ} K_{ВТ}^{Вл} / K_{ВТ}^{СТ} K_{Вл}^{СТ};$$

$$L_{ВТ} = 1 + K_{ВТ}^{СТ} K_{СТ}^{ВТ} + K_{СТ}^{Вл} / K_{СТ}^{ВТ};$$

$$M_{Вл} = T_{G_n}^{СТ} T_{G_n}^{ВТ} K_{G_n}^{Вл};$$

$$M_{СТ} = T_{G_n}^{Вл} T_{G_n}^{ВТ} K_{G_n}^{СТ};$$

$$M_{ВТ} = T_{G_n}^{Вл} T_{G_n}^{СТ} K_{G_n}^{ВТ};$$

$$N_{Вл} = T_{G_n}^{ВТ} K_{G_n}^{Вл} + T_{G_n}^{ВТ} K_{G_n}^{СТ} K_{СТ}^{Вл} + T_{G_n}^{СТ} K_{G_n}^{Вл};$$

$$N_{СТ} = T_{G_n}^{СТ} K_{G_n}^{СТ} + T_{G_n}^{СТ} K_{G_n}^{СТ} K_{Вл}^{СТ} K_{ВТ}^{СТ} + T_{G_n}^{ВТ} K_{G_n}^{Вл} + T_{G_n}^{Вл} K_{G_n}^{ВТ};$$

$$N_{ВТ} = T_{G_n}^{Вл} K_{G_n}^{ВТ} + T_{G_n}^{Вл} K_{G_n}^{СТ} K_{СТ}^{ВТ} + T_{G_n}^{СТ} K_{G_n}^{ВТ};$$

$$Q_{Вл} = K_{G_n}^{Вл} + K_{G_n}^{ВТ} + K_{G_n}^{СТ} K_{СТ}^{Вл} - K_{G_n}^{Вл} K_{СТ}^{ВТ} / K_{СТ}^{Вл};$$

$$Q_{СТ} = K_{G_n}^{СТ} + K_{G_n}^{Вл} K_{Вл}^{СТ} + K_{G_n}^{ВТ} K_{ВТ}^{СТ} - K_{G_n}^{СТ} K_{Вл}^{ВТ} / K_{Вл}^{СТ} - K_{G_n}^{СТ} K_{ВТ}^{Вл} / K_{ВТ}^{СТ};$$

$$Q_{ВТ} = K_{G_n}^{Вл} + K_{G_n}^{ВТ} + K_{G_n}^{СТ} K_{СТ}^{ВТ} - K_{G_n}^{ВТ} K_{СТ}^{Вл} / K_{СТ}^{ВТ};$$

З аналізу рівнянь (4), (5) та (6) видно, що в залежності від співвідношення постійних часу роторів і коефіцієнтів підсилення за частотами обертання стійкість двигуна може бути як аперіодичною, так і коливальною. Як правило, справні трьохвальні ТРДД працюють в області аперіодичної стійкості. Поява коливань на перехідних режимах роботи свідчить про погіршення технічного стану двигуна. Тобто зміна технічного стану двигуна визначається змінами динамічних параметрів, розрахунки яких виконуються за рівняннями, наведеними вище. Для діагностування і виявлення несправних вузлів двигуна використовуються нев'язки, розрахунки яких необхідно проводити відповідно рекомендацій, наведених у роботах [2], [3].

Вхідними даними для розрахунків нев'язок є висотно-швидкісні та дросельні характеристики двигуна на початку його експлуатації, тобто характеристики справного двигуна, а також поточні параметри роботи на сталих та перехідних режимах, записаних на магнітних носіях за допомогою реєстраторів польотної інформації.